اتصال اسفنج آلومینیمی به ورق آلومینیمی در سازه‌های ساندویچی*

آروین تقی‌زاده تبریزی(۱) مازیار آزادبه(۲)

چکیده

سازه‌های ساندویچی به‌دلیل سخت‌پایی ویژه و استحکام بالا، خواص جذب صدا، عایق حرارتی و جذب انرژی ضربه‌ای بهتری نسبت به سازه‌های دیگر، به‌میزان گسترده‌ای کاربرد دارند. در روش‌های متداول تولید صفحه‌ی ساندویچی، از چسب برای اتصال ورق و اسفنج استفاده می‌شود. در تحقیق حاضر، به‌منظور اتصال‌دهی نفوذی اسفنج فلزی به ورق، از روش تف‌جوشی فاز مایع با استفاده از مخلوط پودری آلومینیم و روی استفاده شده است. اتصال‌دهی در دمای ۶۱۰ °C و به‌مدّت زمان ۳۰ دقیقه انجام شد. استحکام برشی اتصال، در حدود ۴/۸ kPa به‌دست آمد.

واژه‌های کلیدی سازه‌های ساندویچی، تف‌جوشی فاز مایع، اسفنج فلزی.

Joining Aluminum foam to aluminum plate in sandwich structures

A. Taghizadeh Tabrizi M. Azadbeh

Abstract

Structural sandwich beams are widely used because of their high specific stiffness and strength, noise reduction, thermal insulation and impact energy absorption characteristics. Conventional manufacturing method of composite sandwich structures is completed by a separate adhesive joining stage by which the composite faces are joined to the core. In this investigation, liquid phase sintering in the Al-Zn alloy system was used in order to form a diffusion bond between metallic foam and plate. Joining treatment was conducted at 610 ^{o}C for 30 minutes in an inert atmosphere. The shear strength of the joint was measured to be about 4.8 kPa.

Key Word Structural sandwich, Liquid phase sintering, Metallic foam.

---

*نسخه‌ی نخست مقاله در تاریخ ۹۲/۸/۱۱ و نسخه‌ی پایانی آن در تاریخ ۹۳/۳/۲٤ به دفتر نشریه رسیده است.

(۱) نویسنده مسئول: کارشناسی ارشد مهندسی مواد، دانشکده مواد، دانشگاه صنعتی سهند تبریز.

(۲) دانشیار دانشکده مواد، دانشگاه صنعتی سهند تبریز.

مقدمه

نسبت استحکام به وزن، یکی از عوامل اصلی در انتخاب سازه‌های مناسب برای کاربرد در زمینه‌های مختلف حمل و نقل شامل هوایی، زمینی و دریایی است. اسفنج‌های فلزی با وجود چگالی کمی که دارند، از استحکام نسبتاً خوبی برخوردارند و به‌این دلیل، در ساخت بسیاری از سازه‌ها استفاده شده‌اند و نتیجه‌ی قابل اطمینانی ارائه داده‌اند. ساختار سلولی و متفاوت اسفنج‌های فلزی، استفاده از روش‌های خاصی برای انجام عملیّات برش‌کاری، جوش‌کاری، اتصال، پوشش و مانند آن را ایجاب می‌کند [3-1].

اگر لازم باشد تا از اسفنج‌های فلزی در صنایع مهندسی استفاده شود، باید روشی را برای اتصال آن‌ها به مواد مهندسی دیگر پیدا کرد. بر خلاف سایر مواد مهندسی، اسفنج‌های فلزی قابل فشرده شدن به‌شکل موم‌سان را دارند. این خاصیّت ویژه‌ی مواد اسفنجی، یک مزیت به‌شمار می‌آید و باعث می‌شود تا از چسب چوب، میخ و سایر روش‌های مشابه اتصال مکانیکی نیز بتوان استفاده کرد. برای اتصال اسفنج به ورق، از روش معمول برای اتصال موقّت و دائم استفاده می‌شود. از بین این روش‌ها، می‌توان به اتصال موقّت پیچ و مهره، پرچ و استفاده از چسب [4]، و روش‌های اتصال دائم مانند جوش‌کاری لیزری، لحیم‌کاری [5]، اتصال نفوذی [6]، و تف‌جوشی پلاسمایی [7] اشاره کرد. برای مثال، در جوش‌کاری گرمای زیاد موجود باعث ایجاد آسیب در ساختار سلولی در نتیجه‌ی ذوب شدن حین جوش‌کاری ذوبی و اعوجاج در جوش‌کاری نفوذی می‌شود. صفحه‌های ساندویچی آلومینیمی برای تولید انبوه در صنایعی هم‌چون صنعت خودرو مناسبند. در حال حاضر، این مواد سبک جایگاه ویژه‌ای را در بین کاربردهای صنعتی در مهندسی مکانیک و در زمینه‌ی خودروهای مسابقه پیدا کرده‌اند [8]. افزون بر این، تحقیقاتی در این زمینه با هدف تولید انبوه در حال انجام هستند [9]. تعریف ابتدایی موجود از صفحه‌های ساندویچی، استفاده از چند لایه در کنار یک‌دیگر و به‌کارگیری یک ماده‌ی چسب برای در کنار هم نگه‌داشتن این مواد می‌باشد [10]. این وضعیّت باعث ناهم‌خوانی این مواد با کاربردهایی است که در آن‌ها از گرما استفاده می‌شود. برای مثال، برای اتصال صفحه‌های ساندویچی تولید شده با این روش به یک‌دیگر نمی‌توان از روش‌های جوش‌کاری و یا لحیم‌کاری به‌دلیل گرمای زیاد ایجاد شده، استفاده کرد. برای اتصال آن‌ها به سازه‌های مختلف، باید از روش‌های مکانیکی مانند پیچ و مهره کردن، پرچ‌کاری و یا اعمال چسب استفاده کرد.

متداول‌ترین روش اتصال‌دهی اسفنج به ورق در صفحه‌های ساندویچی، استفاده از چسب است. به‌دلیل استحکام کم اتصال اسفنج به ورق در این روش در دماهای بالا، استفاده از این صفحه‌های ساندویچی با محدودیّت‌هایی همراه است. برای بهبود استحکام اتصال، از پودر فلزی برای ایجاد اتصال به‌روش تف‌جوشی فاز مایع استفاده می‌شود.

فرایند تف‌جوشی در حضور فاز مایع شامل شکل‌گیری فاز مایع به‌منظور کاهش دمای تف‌جوشی است. در حین انجام تف‌جوشی در حضور فاز مایع، یک فاز مایع در کنار ذرات جامد قرار می‌گیرد. در مجموعه‌های دو فازی شامل پودرهای مخلوط، تشکیل فازی با نقطه‌ی ذوب پایین امکان‌پذیر است. در چنین مجموعه‌ای، مذاب می‌تواند باعث انتقال سریع و در نتیجه، بهبود تف‌جوشی شود. نخستین نیاز در این حالت، ترکنندگی است. مذاب باید یک لایه‌ی نازک دور فاز جامد تشکیل دهد. کوچک بودن زاویه‌ی تماس، نشانه‌ی این است که مایع در سطح جامد پخش شده است. جامد باید در مایع محلول باشد. نهایتاً این‌که انتقال نفوذی اتم‌های حل شده‌ی جامد باید به حد کافی باشد تا بهبود تف‌جوشی را تضمین کند. در تف‌جوشی فاز مایع، مذاب به‌محض تشکیل جاری می‌شود و دانه‌ها را تر می‌کند. با ادامه‌ی عمل گرمایش، فاز جامد در مذاب حل می‌شود و پس از آن، فلز مایع به عنوان حاملی برای اتم‌های فاز جامد در فرایندی موسوم به حل کردن و ته‌نشینی مجدد عمل می‌کند که در آن، دانه‌های جامد ریز در مایع حل می‌شود و مجدداً بر روی سطح دانه‌های درشت رسوب می‌کند [11].

در این تحقیق، امکان اتصال‌دهی اسفنج آلومینیمی به ورق آلومینیم به‌روش تف‌جوشی فاز مایع و با استفاده از مخلوط پودرهای آلومینیم و روی برای بهبود اتصال نفوذی و افزایش استحکام اتصال، بررسی شده است.

مواد و روش‌های آزمایش

در این تحقیق، از اسفنج آلومینیم- سیلیسیم تولید شده به‌روش ریخته‌گری در کارخانه‌ی نِت اسفنج مشهد استفاده شده است. ابتدا اسفنج‌ها در ابعاد ۱۰×۲۵×۵۰ میلی‌متر با استفاده از دستگاه برشی سیمی (وایرکات) بریده شد. ورق‌های آلومینیم تجاری به‌ابعاد ۱×۲۵×۵۰ میلی‌متر آماده شدند. عملیّات آماده‌سازی سطحی برای از بین بردن اکسیدهای سطحی در آلومینیم بر روی سطوح اتصال، به‌ترتیب زیر انجام شد:

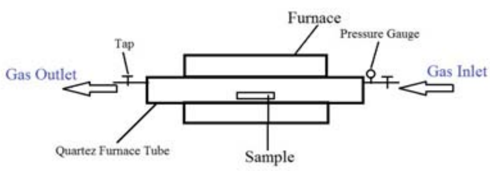
۱- سنباده‌زنی سطوح اتصال اسفنج آلومینیمی با مِش ۸۰.

۲- از بین بردن اکسیدهای سطحی در ورق‌های آلومینیمی با استفاده از برس سیمی.

۳- شستشوی سطحی با اَستون به‌روش فراصوتی به‌مدّت زمان ۱۰ دقیقه.

٤- خشک کردن قطعات در خشک‌کن به‌مدّت زمان ۱۰ دقیقه.

در مرحله‌ی بعد، مخلوط پودر آلومینیم- ۵/۵ درصد وزنی روی که در محلول اَستون به‌صورت سوسپانسیون آماده شده بود، بر روی سطوح اتصال ریخته شد. عملیّات تف‌جوشی در محیط گاز نیتروژن در دمای $610\ ^{o}C$ به‌مدّت زمان ۳۰ دقیقه انجام شد. طرح‌واره‌ای از فرایند اتصال‌دهی، در شکل (۱) آورده شده است.

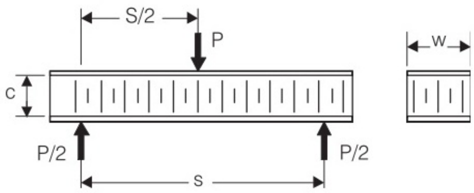


شکل ۱ طرح‌واره‌ای از فرایند اتصال‌دهی

برای تعیین استحکام برشی اتصال، از آزمون خمش سه‌نقطه‌ای استفاده شد. طرح‌واره‌ای از این آزمون، در شکل (۲) نشان داده شده است. محاسبات به‌کمک رابطه‌ی زیر انجام شدند:

$$\tau = \frac{P}{2cw} \qquad (1)$$

که در آن، P نیروی اعمالی کل، c ضخامت هسته‌ی نمونه (بخش اسفنج) و w عرض نمونه است.



شکل ۲ طرح‌واره‌ای از آزمون خمش سه‌نقطه‌ای [12]

افزون بر این، پس از انجام حکّاکی شیمیایی به‌وسیله‌ی محلول کِلِر، مطالعات میکروسکُپ الکترونی روبشی به‌منظور بررسی‌های ریزساختاری، انجام شد.

نتایج و بحث

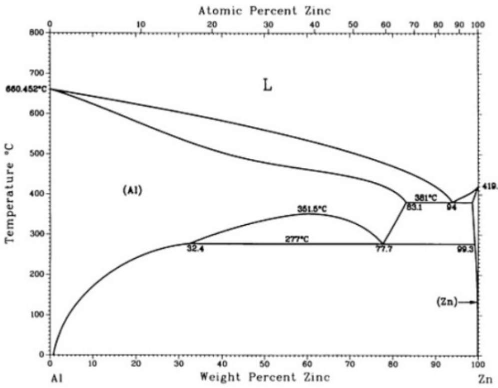
پس از بررسی سطوح قطعات با چشم غیرمسلّح (شکل (۳))، هیچ‌گونه عیبی در اتصال و سلّول‌های اسفنج آلومینیمی مشاهده نشد. باریک‌شدگی ورق بالایی در عملیّات اتصال‌دهی، در تصویرهای شکل (۳) قابل مشاهده است. علّت وقوع این پدیده را می‌توان به اعمال فشار به‌منظور نگه‌داری نمونه‌ها بر روی هم در فرایند تف‌جوشی نسبت داد. این فشار برای شکستن لایه‌های اکسیدی پایدار بر روی ذرات پودر آلومینیم در تف‌جوشی آلومینیم وارد می‌شود.



شکل ۳ تصویری درشت از نمونه‌ی اتصال داده شده

نمودار فازی آلومینیم- روی در شکل (٤)،

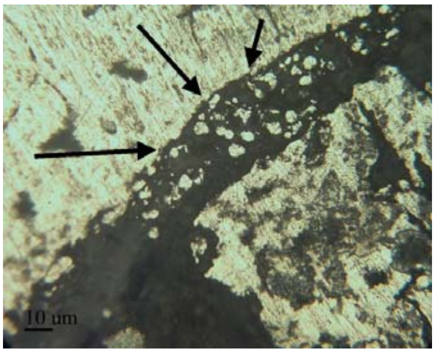
نشان‌دهنده‌ی ویژگی‌های یک سیستم ایده‌آل برای تف‌جوشی فاز مایع است. این ویژگی‌ها، نقطه‌ی ذوب پایین فلز خالص روی، عدم تشکیل فاز میانی و حلالیّت کامل در حالت مایع می‌باشند. با این‌حال، حلالیّت در حالت جامد غیرایده‌آل است. در دمای ۳۸۱ ^oC، حلالیّت بیشینه‌ی روی در آلومینیم در حالت جامد برابر با ۸۳/۱ درصد و برای آلومینیم در روی برابر با ۱/۲ درصد می‌باشد. بنابراین، فاز مایع تشکیل شده در دستگاه آلیاژی آلومینیم- روی، شدیداً گذراست. این فاز مایع، مربوط به فاز $Al_{0.71}Zn_{0.29}$ در دمای ٤۳۷ ^oC می‌باشد، ضمن آن‌که فرایند ذوب شدن روی در دمای ٤۲۰ ^oC رخ می‌دهد.



شکل ٤ نمودار فازی آلومینیم- روی [13]

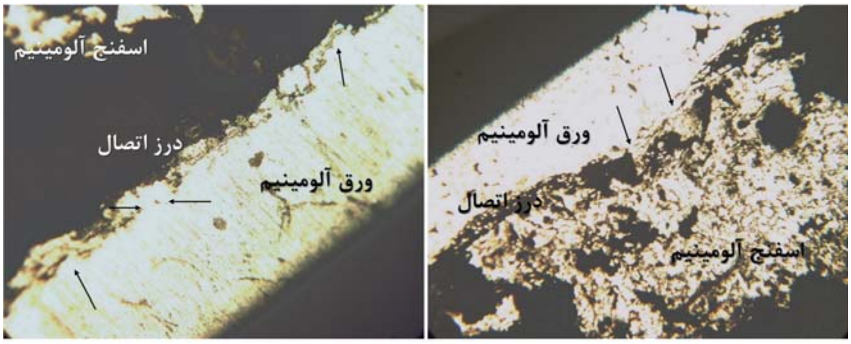
همان‌گونه که در شکل (٥) مشاهده می‌شود، در طول عملیّات اتصال‌دهی و تف‌جوشی فاز مایع، یک ناحیه‌ی باریک از اسفنج در فصل‌مشترک اتصال ایجاد می‌شود که بر اساس نتایج آزمون خمش، باعث تقویت و بهبود خواص اتصال می‌شود. این ناحیه در شکل (٥) که با میکروسکُپ نوری تهیّه شده است، مشاهده می‌شود. افزون بر این، فشار بخار بالای فلز روی باعث ایجاد تخلخل اضافی در فصل مشترک می‌شود و این خود باعث ایجاد یک ناحیه‌ی اسفنجی در فصل مشترک و جلوگیری از بروز تغییرات ناگهانی ریزساختاری در این ناحیه می‌شود. این جزئیات، در فصل مشترک شکل (٥) قابل مشاهده‌اند.

تصویرهای میکروسکُپی مربوط به درز اتصال که توسط محلول کِلِر حکّاکی شیمیایی شده‌اند، در شکل (٦) نشان داده شده‌اند. در این تصویرها، نواحی مختلف سازه‌ی ساندویچی مشخص شده‌اند. سه ریزساختار متفاوت در ناحیه‌ی اتصال قابل تشخیص است. این نواحی به‌ترتیب مربوط به اسفنج آلومینیمی سلول بسته، ناحیه‌ی اسفنجی سلول باز تشکیل شده توسط پودر میان لایه‌ای و ورق آلومینیمی هستند. در مناطقی که با پیکان مشخص شده‌اند، هیچ مرزی دیده نمی‌شود که این نشان‌دهنده‌ی برقراری اتصال متالورژیکی بین اسفنج و ورق می‌باشد.



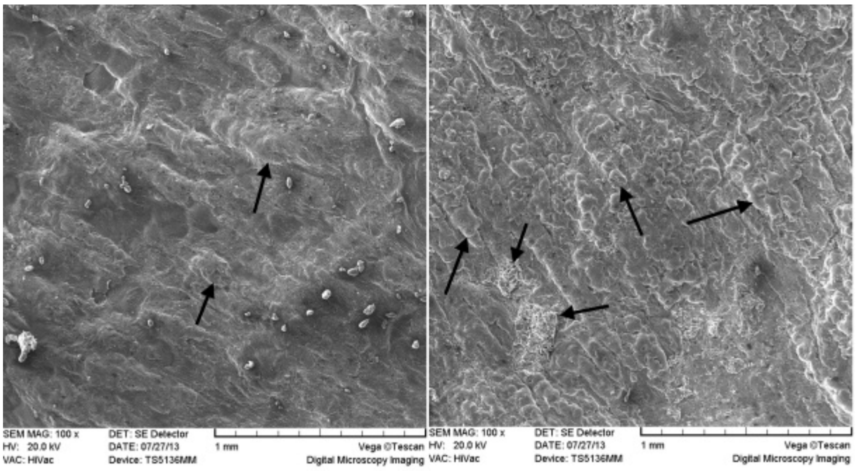
شکل ٥ ناحیه‌ی اسفنجی تشکیل یافته در فصل مشترک اتصال

تصویرهای میکروسکُپ الکترونی روبشی، در شکل (٧) ارائه شده‌اند. این تصویرها نشان می‌دهند که فاز مایع فوق‌الذکر تشکیل شده است و انجماد آن سریع بوده است. این مقدار فاز مایع، باعث بهبود و تسریع نفوذ به‌کمک نیروی مویینگی ایجاد شده توسط سلول‌های اسفنج آلومینیمی در فصل مشترک اتصال شده است. این هم‌راستایی نیروی مویینگی و نیروی جاذبه، در تصویر میکروسکُپ الکترونی روبشی به‌شکل کشیدگی‌ها و برجستگی‌هایی مشخص است. این کشیدگی باعث شده است تا فاز مایع به‌درون سلول‌های اسفنج آلومینیومی راه بیابد و امکان نفوذ ذرات روی را در اسفنج فراهم کند. افزون بر این، در تف‌جوشی فاز مایع، مذاب در محل‌های حضور ذرات افزودنی به‌وجود می‌آید. این مذاب تشکیل شده، ذرات پودری آلومینیم را احاطه می‌کند. در شکل (٧)، ذرات آلومینیم که به‌صورت جزیره‌هایی توسط فاز مایع احاطه شده‌اند، قابل مشاهده‌اند.



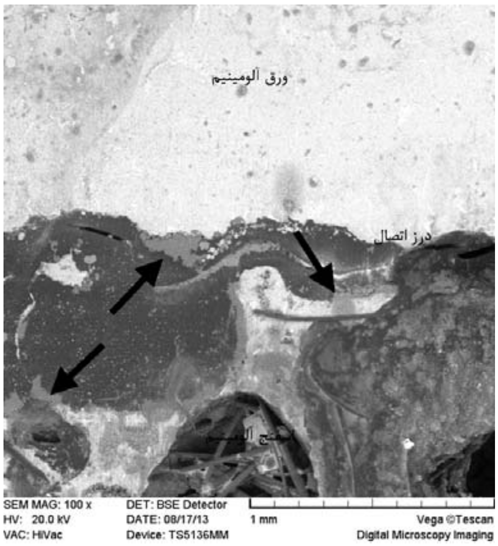
ب الف

شکل ٦ تصویر میکروسکُپی از فصل مشترک اتصال؛ الف) صفحه‌ی بالایی اتصال و ب) صفحه‌ی پایینی اتصال

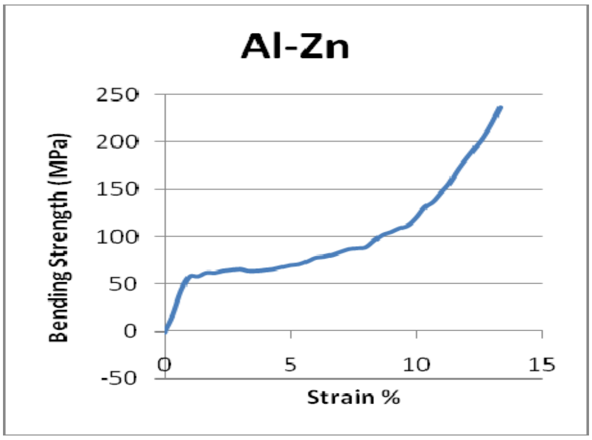


ب الف

شکل ٧ تصویرهای میکروسکپ الکترونی روبشی از سطوح شکست صفحه‌های اتصال؛ الف) صفحه‌ی اتصال بالایی و ب) صفحه‌ی اتصال پایینی



شکل ٨ آخال‌های اکسیدی نشان داده شده با پیکان، مانع از پخش شدن کامل فاز مایع شده‌اند.



شکل ۹ نمودار تنش- کرنش خمشی نمونه‌ی آزمون

اگر چه هم‌راستایی نیروهای مویینگی و جاذبه باعث افزایش احتمال نفوذ عنصر روی به‌درون اسفنج آلومینیمی در سطح اتصال شده است، ولی از بین نرفتن آخال اکسیدی درون سلول‌ها در عملیّات آماده‌سازی سطحی که در شکل (۸) مشخص شده است، به‌عنوان سد عمل کرده و مانع از پخش کامل فاز مایع شده است. افزون بر این، ناهمواری‌های سطحی در سطح اتصال اسفنج و فرورفتگی‌های مربوط به تخلخل موجود در اسفنج باعث ایجاد موانعی برای پخش شدن مذاب در طول فصل مشترک اتصال می‌شوند.

هم‌راستایی نیروهای مویینگی و گرانش در صفحه‌ی بالایی، باعث حضور میزان بیش‌تری از فاز مایع درون حفره‌های اسفنج آلومینیمی شده است و فرصت بیش‌تری را برای نفوذ عناصر در این فصل مشترک و برقراری پیوند متالورژیکی ایجاد کرده است و در نتیجه، باعث افزایش استحکام سطح اتصال بالایی شده است. در آزمون خمش، هیچ شکستگی و از کارافتادگی در سطح بالایی تحت فشار دیده نشد و شکست در محل اتصال در ورق پایینی که تحت کشش قرار داشت، رخ داد.

نمودار تنش- کرنش خمشی به‌دست آمده از آزمون، در شکل (۹) نشان داده شده است. در این نمودار، رفتار کش‌سان خطی در کرنش‌های پایین قابل مشاهده است. همان‌گونه که دیده می‌شود، این نمودار بسیار وسیع و هموار است. سطح زیر نمودار، نشان‌دهنده‌ی میزان انرژی در واحد حجم اولیّه‌ی نمونه است و می‌تواند توسط جاذب انرژی جذب شود. استحکام خمشی نهایی در نقطه‌ی شکست به‌دست آمده است و مقدار آن در حدود ۲٤۰ MPa به‌ازای ازدیاد طول برابر با ۱۳/۵ درصد می‌باشد. مطابق با رابطه‌ی (۱)، استحکام برشی اتصال در حدود ٤/۸ kPa به‌دست آمد.

نتیجه‌گیری

صفحه‌ی ساندویچی با اسفنج آلومینیمی، با اتصال‌دهی اسفنج به ورق با استفاده از میان لایه‌ی پودری مخلوط آلومینیم- روی و تف‌جوشی فاز مایع در دمای ٦۱۰ °C به‌مدّت زمان ۳۰ دقیقه ساخته شد.

استحکام خمشی برابر با ۲٤۰ MPa در نقطه‌ی شکست و استحکام برشی به‌میزان ٤/۸ kPa (محاسبه شده) به‌دست آمد. به‌علّت وجود فاز مایعِ گذرا و هم‌سویی نیروهای مویینگی و گرانش در سطح بالایی اتصال، هیچ شکستگی و از کارافتادگی در این سطح دیده نشد. افزون بر این، فشار بخار بالای فلز روی باعث ایجاد تخلخل اضافی در فصل مشترک شد و این باعث ایجاد یک ناحیه‌ی اسفنجی در فصل مشترک و بیش‌تر شدن بخش قومی (اسفنجی) و جلوگیری از تغییرات ناگهانی ریزساختاری در این ناحیه شد. به‌این وسیله، خواص مکانیکی اتصال بهبود یافت.

مراجع

۱. م. دیواندری، ع. وحید گلپایگانی، ح.ر. شاهوردی، "فوم‌های فلزی"، مرکز انتشارات دانشگاه علم و صنعت ایران، (۱۳۸۹).

۲. س. م. زبرجد، ح. خدیوی آیسک، ن. ساسانی، ا. ظهور وحید کریمی، "مقدمه‌ای بر مواد پیش‌رفته"، موسسه چاپ و انتشارات دانشگاه فردوسی مشهد، (۱۳۸۹).

3. Hans-Peter Degischer, Brigitte Kriszt, "Handbook of Cellular Metals, Production, Processing, Applications", Wiley-VCH, (2002).

4. O. B. Oluran, N. A. Fleck, M. F. Ashby, "Joining of aluminum Foams with fasteners and adhesives", *Journal of Material Science*, 35, pp. 1079-1085, (2000).

5. Yongxian Huang, Jing Gong, Shixiong Lv, Jinsong Leng, Yao Li, "Fluxless soldering with surface abrasion for joining metal foams", Materials Science and Engineering A, (2012).

6. K. Kitazono, A. Kitajima, E. Sato, J. Matsushita, K. Kuribayashi, "Solid state diffusion bonding of closed cell aluminum foams", Materials Science and Engineering A, 327, pp. 128-132, (2002) .

7. Young Ho Ko, Se Hun Chung, Ik Hyun Oh, Jae Ik Cho, Chang Seog Kang, "Joining of Aluminum Foam/Aluminum Metal by Spark Plasma Sintering", Advanced Materials Research, 8, pp. 1394-1352, (2007).

8. E. Bozhevolnaya, A. Lyckegaard, O.T. Thomsen, "Novel design of foam core junctions in sandwich panels", Composites: Part B, 39, pp. 185-190, (2008).

9. Dirk Schwingel, Hans-Wolfgang Seelinger, Claude Vecchionacci, Detlef Alwes, Jurgen Dittrich, "Aluminum foam sandwich structures for space application", Acta Astronautica, 61,pp. 326-330, (2007).

10. Chang Sup Lee, Dai Gil Lee, Je Hoon Oh, "Co-cure binding method for foam core composite sandwich manufacturing", Composite Structures, 66, pp. 231-238, (2004).

11. Randall M. German, Liquid Phase Sintering, Plenum Press, 1-2, (1985).

12. Mechanical Testing of Sandwich Panels, Technical Notes, Hexcel Composites, Publication LTU035b, (2007).

13. Alloy Phase Diagrams, ASM Handbook, Vol. 3, ASM International, Materials Park, OH, (1992).